

# ADTF 通用多功能光学设计程序

王 永 仲

(国防科技大学物理系)

## 提 要

本文介绍一个实用多功能光学设计程序;提出在适应法程序中移植阻尼最小二乘法评价函数思想的观点,并创造一种新型优化指标实现了这种移植;对焦距缩放、光阑位置优化、节省几何光学传递函数(OTF)计算时间等提出了看法。

## 一、引 言

在电子计算机普遍应用的今天,我们希望有一个功能完备的光学设计程序,借以完成除拟定初始结构之外的整个设计过程。即要求它不仅能做一般光路计算,而且能做自动设计,特别是能得心应手地把传统的设计思想交融于当今自动设计技术中,还能实现光学传递函数评价与自动设计过程的方便结合,以随时准确反映优化质量。我们的ADTF通用FORTRAN程序试图达到上述目标。它力图学习各程序的长处,旨在“方便”和“实用”上下功夫。经过五年多的改进和考核,证明它取得了较好的实用效果。

## 二、关于优化指标 $S_T$

阻尼最小二乘法和适应法是流行的自动设计方法,但实用中各有长短。我们希望在同一个程序中同时体现两种优化思想,以求互相补充扬长避短,于是探索把评价函数概念移植到我们的适应法程序中。并认定,解决此问题还要符合以下原则:程序不能明显膨胀;不过多增加计算量;符合多数人的习惯;使用方便。

经过摸索和实践,我们选定大家熟悉的子午光束垂轴像差曲线构成优化指标,达到了预期目的。即:把轴上点、0.707视场点和边缘视场点各自的子午光束垂轴像差曲线都按相对孔径座标轴作数值积分,得其面积  $S_{0\omega}$ 、 $S_{0.7\omega}$ 、 $S_{1\omega}$ , 求加权之和为:

$$S'_T = 4S_{0\omega} + 2S_{0.7\omega} + S_{1\omega},$$

为使用方便,将起始值规范化为1,规范化后记为  $S_T$ , 这就是我们用以体现评价函数思想的新型优化指标。其中各面积的计算,是按光路计算常规,对0.3、0.5、0.707、0.85、1等五个相对高度追迹光线后,用辛卜生公式作数值积分而得。加权的意思是为体现不同视场的主要性应有差异。由上可知,我们没有增加追迹光线的计算量。 $S_T$ 的计算系由14个弗权语句完成,未使程序明显膨胀。实践证明,  $S_T$ 的引入解决了适应法的两个重大问题,一是排除相关因素,摆脱病态;二是避免因初始结构太差而产生早期发散。前者加快优化进

程, 后者使初始结构的拟定变得容易。众所周知, 初始结构较差时, 以传统的单项几何像差施行控制, 常因像差相关而使优化过程陷入“病态”——设计过程辗转不前。而使用  $S_T$  先做预优化, 再转入对一般几何像差的控制, 就能顺利摆脱“病态”, 实现快速稳定的收敛。我们曾以常用的几类系统做过这种试验, 没有发现反例。其中尤以结构复杂、受控像差多的照相物镜为突出。例, 设计一个三片型物镜 ( $f' = 30$ ,  $2\omega = 50^\circ$ ,  $D/f' = 1/4$ ), 所定初始结构像差很大 (如球差  $\delta L'_1 = 4.39$ ,  $K'_{T1} = -0.48$ ,  $x'_{11} = 7.37$ , 视场高级球差  $\delta L'_{Ty} = 18.36$ ), 以一般几何像差施行控制, 则在第五次矩阵后陷入“病态”, 处理效果欠佳。我们试以  $S_T$  做先行优化, 使之降低 60%, 再转入上述过程, 则快速而稳定地收敛到预期目标, 全部设计连同点列图、OTF 计算、透镜焦距截距计算、渐晕和通光孔径计算等, 在国产 DJS-8 机上只花 11 分钟, 各受控像差都完好地矫到了目标值, OTF 情况也好<sup>[3]</sup>。为了  $S_T$  的运用方便有效, 本程序的结构保证设计者可以随时将  $S_T$  纳入控制, 也可随时由对  $S_T$  的控制转入对其它像差的矫正, 还可同时进行优化。

### 三、三角公式在 OTF 计算中的应用

几何光学 OTF 计算式中含有大量三角函数运算, 很费时间。如几何调制传递函数公式:

$$\text{轴上: } VTF(\mu) = \frac{1}{N} \sum_1^N \cos(2\pi\mu \cdot \delta y_j) \quad (\mu \text{——空间频率})$$

$$\text{轴外: } MTF_s(\mu) = \frac{1}{N} \sum_1^N \cos(2\pi\mu \cdot \delta z_j);$$

$$MTF_t(\mu) = \sqrt{a^2 + b^2};$$

$$\text{其中} \quad a = \frac{1}{N} \sum_1^N \cos(2\pi\mu \cdot \delta y_j), \quad b = \frac{1}{N} \sum_1^N \sin(2\pi\mu \cdot \delta y_j)。$$

( $\delta y_j, \delta z_j$  是第  $j$  条光线的垂轴像差。) 假定按轴上点和四个轴外点对三种波长取  $N$  条光线计算 20 个频率分点, 则按上述公式要做  $(300N)$  次正弦余弦运算。但若令  $\alpha = 2\pi \cdot \Delta\mu \cdot \delta y$ ; ( $\Delta\mu$  为频率间隔值), 则各频率分点分别为  $\alpha, 2\alpha, \dots, k\alpha, \dots, 20\alpha$ ,  $k=1$ , 作正弦余弦计算求得  $\sin \alpha$  和  $\cos \alpha$ ;

$$k=2, \quad \sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha,$$

$$\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha;$$

$$k=3, \quad \sin 3\alpha = \sin 2\alpha \cdot \cos \alpha + \cos 2\alpha \cdot \sin \alpha,$$

$$\cos 3\alpha = \cos 2\alpha \cdot \cos \alpha - \sin 2\alpha \cdot \sin \alpha;$$

依此类推, 除第一频率外, 每一三角函数值皆可由前面的结果求得, 于是把三角计算转化为简单的算术运算。对上面例子, 只须做  $(15N)$  次正弦余弦计算, 其量仅为原来的  $1/20$ , 节省机时的效果十分明显。本程序就是这样做的。

### 四、关于焦距缩放

焦距缩放是手工设计时的常用方法。我们这里要说的是, 它不仅是调整焦距的手段, 而

且是摆脱“病态”加快收敛的重要途径。为不另列数据,还以上面“二”中提到的三片型物镜来说。已经知道,开始就以光焦度  $\varphi$  和边缘像差做优化曾陷入“病态”。但若做一次焦距缩放后再转入上述矫正,其它条件都不变,设计过程却告顺利完成。虽则当时  $f' = 31.14$  与要求值  $f' = 30$  相差不多,却简单地通过一次焦距缩放使系统避开了“病态”。为不失一般性,我们曾对各类系统进行这种试验,结论都是肯定的。追溯其理论依据,归纳为三点:(1)焦距缩放改变了系统在变量空间所处的位置,而这种“改变”本身就是使之跳离“病态”的一种方式;(2)焦距缩放使系统在像差空间对应的位置变化,于是新像差点至目标点的多维“距离”矢量之模和幅角都与原来“病态”时回异;(3)借用了像差与结构参数的非线性关系,因而缩放后的新像差并非象结构参数那样是成比例缩放过来的,于是它们对各变量的差分都与原来互不相关,即像差方程组以全新的系数矩阵调整了求解方向。概言之,反映在数学上,即是像差方程组的左右端都出现了摆脱“病态”的变化。在计算机上完成一次焦距缩放只是转瞬功夫,却为我们解决摆脱“病态”和加快收敛这一重要问题提供了新的途径。按我们的经验,自动设计信息前规定一个焦距缩放信息,常有助于整个优化过程的快速收敛。有时需要以同一结构设计不同的系统,本程序的焦距缩放功能正可方便地充当这种纽带。

## 五、关于光阑位置的优化

光阑在系统内部时,自动设计中仅以光阑两侧间隔为变量来优化可能是不够的。因为其起始位置可能不在最佳区间,这样优化的结果只是“劣中之优”。例,某专利载有如图 1 物镜,未指明光阑位置。欲以它为基础设计一个类似镜头。我们可这样找其最佳位置:先假定在第 4、5 面间,描光路使得入瞳距  $L_s$ , 将  $L_s$  列为变量参与优化,得优化值  $L_s^*$ , 并输出了对应的光阑位置。此位置若与原假定不符,便说明原区间不对,这时仅以光阑两侧间隔来优化就无法纠正,因受边界条件的约束,它不可能越出原来假定的区间,因而限制了光阑位置的充分优化。考虑到此,本程序为合理解决这一问题提供了方便。

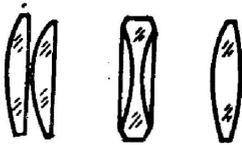


图 1

## 六、有关技术参数和计算实例

(1) 本程序包括一个主程序和十九个子程序,数存用量 32 K,各子程序功能单一,主段结构明晰且分段自锁,便于微处理机移植。

(2) 通用于共轴球面系统,其总面数  $\leq 40$ ; 一个自动设计信息限控 20 种像差,限用 60 个变量,但一次可规定多个自动设计信息;色光数 1 或 3; 网络比五种(0.25、0.2、0.15、0.125、0.1); 频率分点 11 个。

设计如图 2 反摄远物镜<sup>[1]</sup>,要求  $f' = 37$ ,  $2\omega = 60^\circ$ ,  $D/f' = 1/2$ 。初始结构取自参考文献[1]p. 541。

变量 20 个:  $c_1 \sim c_7$ ;  $c_9 \sim c_{15}$ ;  $d_4 \sim d_8$ ;  $d_{10}$ 。

受控像差如下表(先控制前 8 种,再增加对后 5 种的收缩);

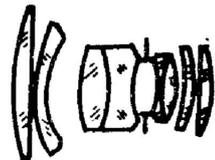


图 2

像 差	起 始 值	目 标 值	公 差	优 化 结 果
光 焦 度 $\varphi$	.02667	.02703	.0	.02703
孔径边缘(1h)球差 $\delta L'_1$	.487	.0	.0	.0
视场边缘(1 $\omega$ )、1h 子午彗差 $K'_{T1}$	-.035	.0	.0	-.0012
1 $\omega$ 细光束子午场曲 $x'_{i1}$	1.733	-.2	.0	-.177
1 $\omega$ 细光束弧矢场曲 $x'_{s1}$	.577	.1	.0	.102
1 $\omega$ 畸 变 $\Delta y'_1$	-.427	.0	.4	-.23
0.707h 轴向色差 $\Delta L'_{gc.7}$	-.281	.0	.0	.0
1 $\omega$ 垂轴色差 $\Delta y'_{gc1}$	.0151	.015	.0	.0147
轴上剩余球差 $\delta L'_{sn}$	-.204	-.1	-.15	-.149
子午视场高级球差 $\delta L'_{Ty}$	-.396	.0	.2	.229
0.707 $\omega$ 、1h 剩余子午彗差 $K'_{Tsn.7}$	.064	.0	.03	-.012
剩余子午场曲 $x'_{ism}$	-.106	.0	-.15	.043
色 球 差 $\delta L'_{gc}$	.468	.2	-.4	.404

主要像差如下表: ( $h=9.25, \omega=-30^\circ$ ) (对 g、c 线消色差)

象 差 h, $\omega$	$\delta L'$	$\Delta L'_{gc}$	$x'_i$	$x'_s$	$K'_T$	$K'_s$	$\Delta y'$	$\Delta y'_{gc}$	$\delta L'_T$	$\delta L'_s$
1	.0	.259	-.177	.102	-.001	-.143	-.23	.0147	.23	.81
.707	-.15	.0	-.046	-.33	-.013	-.046	-.146	-.025	.12	.36

像 差	$\delta L'_{sn}$	$\delta L'_{Ty}$	$\delta L'_{sy}$	$K'_{Tsnh}$	$K'_{Tsn.7}$	$x'_{ism}$	$x'_{ssn}$	$\delta L'_{gc}$	$\Delta y'_{gcsn}$
数 值	-.149	.229	.81	-.009	-.012	.043	-.384	.404	-.0354

$f'=37.00, v'=39.91, y'_0=21.36。$

表中  $\delta L'_T, \delta L'_s$  各为轴外子午球差和弧矢球差;  $\delta L'_{sy}$  为弧矢视场高级球差;  $K'_{Tsnh}$  为 1 $\omega$ 、0.707h 的剩余子午彗差;  $\Delta y'_{gcsn}$  是色畸变; 余者前面已有说明。

优化出的结构参数如下:

r	d	$n_D$	$n_g$	$n_c$	玻 璃
90.019	4.84	1	1	1	ZK11
1227.474	0.1	1	1	1	
32.829	2.26	1.5163	1.52627	1.51389	K <sub>9</sub>
17.604	11.563	1	1	1	
44.730	8.48	1.70166	1.72362	1.69673	ZBaF30
-109.573	10.803	1.5688	1.58154	1.56582	BaK7
38.160	2.565	1	1	1	
(光阑)	2.927	1	1	1	
-18.443	1.03	1.7172	1.74926	1.71037	ZF3
33.790	7.384	1.6568	1.67306	1.65306	ZBaF3
-26.247	0.1	1	1	1	
-213.315	3.08	1.6384	1.65289	1.63506	ZK11
-29.596	0.1	1	1	1	
102.300	3.56	1.6384	1.65289	1.63506	ZK11
-66.344		1	1	1	

线对/mm		5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
MTF	轴上点 MTF	.902	.677	.421	.216	.120	.112	.133	.149	.146	.120
MTF <sub>0.7</sub>	无离焦	.867	.643	.396	.202	.077	.051	.074	.080	.061	.027
	离焦(-.05)	.853	.615	.394	.242	.134	.062	.024	.018	.010	.001
	离焦(-.1)	.814	.522	.305	.179	.088	.026	.005	.015	.017	.014

程序算出系统瞳孔实际通光面积占 60%，并计算了光线分布点列图，下面摘录 OTF 数据：

设计结果的像差曲线如下：

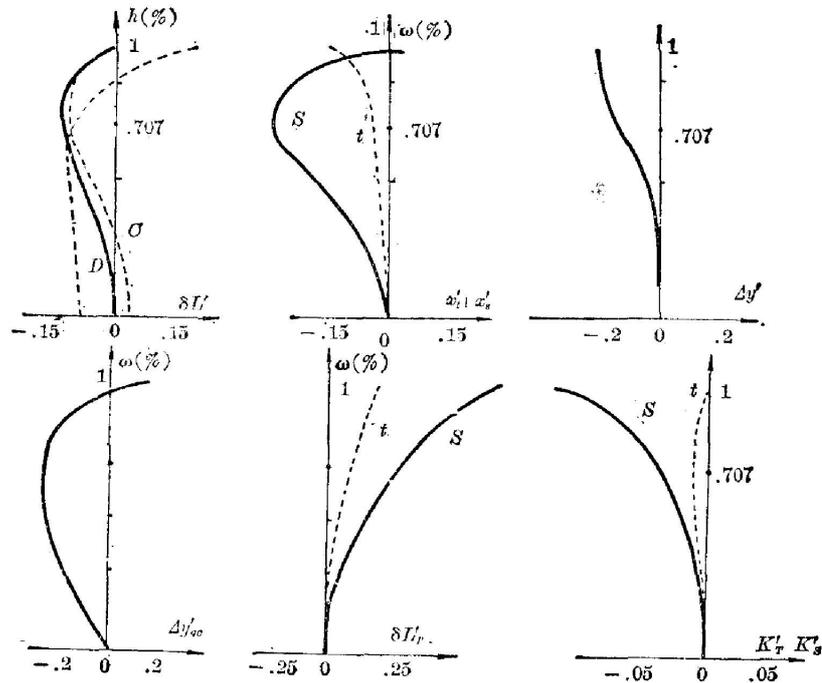


图 3

本程序的基础是在北京工业学院学习时由导师陈晃明指导所做的工作，并感谢该校袁旭沧、丁汉章、北京邮电学院徐大雄、清华大学王民强等老师赐教。

### 参 考 文 献

- [1] 袁旭沧;《光学设计》, (科学出版社, 1983).
- [2] 姜伟麟;《光学传递函数及其数理基础》, (国防工业出版社, 1979).
- [3] 王永仲;《国防科技大学学报》, 1983, No. 1, 1.
- [4] 王永仲;《国防科技大学学报》, 1983, No. 4, 27.

## ADTF universal multifunctional optical design program

WANG YONGZHONG

(Department of Physics, National University of Defense Technology, Changsha)

(Received 2 August 1984; revised 29 October 1984)

### Abstract

A universal program for optical design is presented in this paper. The idea of assessment function in DLS method has been introduced into the adaptive method, and a new quality index has been suggested for it. A discussion is made regarding scaling focal length, optimization of stop distance and saving the time for OTF calculation.

### 高重复频率超短脉冲激光器通过鉴定

中国科学院上海光学精密机械研究所研制的“高重复频率超短脉冲激光器”样机于一九八五年二月七日通过了鉴定。与会的专家们对激光器的性能指标进行了逐项测试,测试结果如下:

激光脉冲串能量	> 8mJ。
输出脉冲稳定性	10PPS ± 2% 33PPS ± 4%,
单脉冲宽度	32PS 左右。(由条纹相机测定,波形光滑)
锁模概率	100%。
方向性	0.5~0.6mrad
激光模式	TEM <sub>00</sub> ,
重复频率	10PPS, 20PPS, 33PPS

专家们一致认为,该激光器与国内同类激光器相比,具有高重复频率、高锁模概率、高稳定性和窄脉冲、脉冲波形光滑等特点,是国内第一台“高重复频率超短脉冲激光器”样机,其结构轻便,电源紧凑。对激光器进行测试的方式先进,数据可靠可信,激光器性能属国内领先水平,已达到国外同类产品的先进水平。

高重复频率超短脉冲激光器可用于第三代人造卫星测距仪,提高测量精度,也可用于激光物理及高时间分辨激光光谱,提高其数据收集率和测量速率。鉴定会后,已有单位提出订货。目前,该激光器已具备小批量生产的能力。该机外观及内形见封底照片。